

# Revista Latino-Americana de Inovação e Engenharia de Produção

---

## Aplicações da pesquisa operacional no setor de mineração: estudo bibliométrico no período de 2006 a 2016

## Applications of operational research in the mining sector: bibliometric study for the period from 2006 to 2016

Luciano Wallace Gonçalves Barbosa<sup>1</sup>

Sílvia Maria Santana Mapa<sup>2</sup>

**RESUMO:** O objetivo do presente trabalho é apresentar como as técnicas da Pesquisa Operacional têm sido exploradas no setor industrial de mineração. Para isso, foi realizado um estudo bibliométrico, onde foram analisados artigos publicados em periódicos e congressos nacionais e internacionais, no período de 2006 a 2016. Através da seleção dos artigos, foram feitos fichamentos individuais para proceder à análise qualitativa dos mesmos. Posteriormente, a análise quantitativa foi gerada e exposta neste trabalho, onde se discutem os principais achados sobre a temática e as principais lacunas existentes. Como principais resultados, cita-se a preferência de aplicação de técnicas exatas que resultam em solução ótima do problema, mas também é apresentado que não se pode afirmar qual das ferramentas é mais eficiente, uma vez que soluções semelhantes para o mesmo problema são encontradas utilizando-se metodologias distintas.

**Palavras-chave:** Revisão bibliométrica; Pesquisa operacional; Setor mineral.

**ABSTRACT:** The objective of this paper is to present how is the application of the techniques of the Operational Research in the industrial sector of mining. A bibliometric study was carried out to analyze articles published in national and international journals and congresses from 2006 to 2016. Through the selection of the articles, individual files were made for qualitative analysis. Subsequently, the quantitative analysis was generated and exposed in this work, where the main findings on the theme and the main gaps are discussed. As the main results, it is cited the preference of applying exact techniques that result in an optimal solution of the problem, but it is also presented that it is not possible to say which of the tools is more efficient, since similar solutions to the same problem are found using different methodologies.

**Keywords:** Bibliometric review; Operational Research; Mineral sector.

---

<sup>1</sup> Graduado em Engenharia de Produção, Instituto Federal de Minas Gerais, Campus Congonhas, Departamento de Engenharia de Produção, Congonhas, MG/Brasil. E-mail: [luciano.wallace@hotmail.com](mailto:luciano.wallace@hotmail.com).

<sup>2</sup> Doutora em Ciência da Computação, Docente no Instituto Federal de Minas Gerais, Campus Congonhas, Departamento de Engenharia de Produção, Congonhas, MG/Brasil. E-mail: [silvia.mapa@ifmg.edu.br](mailto:silvia.mapa@ifmg.edu.br).

## 1 INTRODUÇÃO

O cenário econômico mundial tem sido cada vez mais acirrado, em busca de redução de custos, aumento de produção e eficiência, sem comprometer a qualidade, que se tornou mais que um aspecto competitivo, mas um requisito dos clientes. Nessa perspectiva, a tomada de decisão entra como importante fator de auxílio aos gestores das empresas, seja em âmbito financeiro, seja operacional (BELFIORE & FÁVERO, 2013; HILLIER & LIEBERMAN, 2013). Nesse contexto, as indústrias têm buscado, em alta escala, técnicas que auxiliem seus tomadores de decisão, sendo muitas dessas pertencentes à Pesquisa Operacional. O setor de minério de ferro brasileiro foi um dos que obteve retornos significativos com a aplicação da técnica em suas operações, como pode ser observado em Silva et al. (2014), Amaral e Pinto (2010), Pantuza Jr, Souza e Cabral (2009), Guimarães, Souza e Pantuza Jr. (2007), Rodrigues (2006), Moraes (2005), Merschmann (2002), dentre outros.

Nos últimos anos, esse setor tem passado por uma crise que comprometeu uma parcela significativa da economia brasileira, principalmente pela grande participação da indústria extrativa no contexto econômico nacional, representando aproximadamente 8% na formação da média das indústrias brasileiras, maiormente pelo minério de ferro, segundo dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, publicados em março de 2017 (IBGE, 2017).

A economia do setor mineral brasileiro, segundo o Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM, 2016), tem sofrido um grande impacto negativo desde 2013, principalmente pelo fato da queda acelerada do preço do minério de ferro. A visão macroeconômica do setor também é negativa e teve influência significativa nessa crise, pelo fato de o país ter reduzido à metade seu volume de exportação de bens minerais no ano de 2015. Além desses fatores, a Produção Mineral Brasileira (PMB) sofreu forte declínio no ano citado, também ocasionada pela queda do preço de *commodities* minerais, e em especial pelo preço do minério de ferro (IBRAM, 2016).

A produção mineral, medida em valores de produção (em dólar), tem sofrido uma queda significativa a partir desse período, como mostra a Figura 1, que também evidencia o fechamento de 2016 com uma produção ainda menor que o ano anterior, havendo uma projeção de pequeno aumento para 2017.

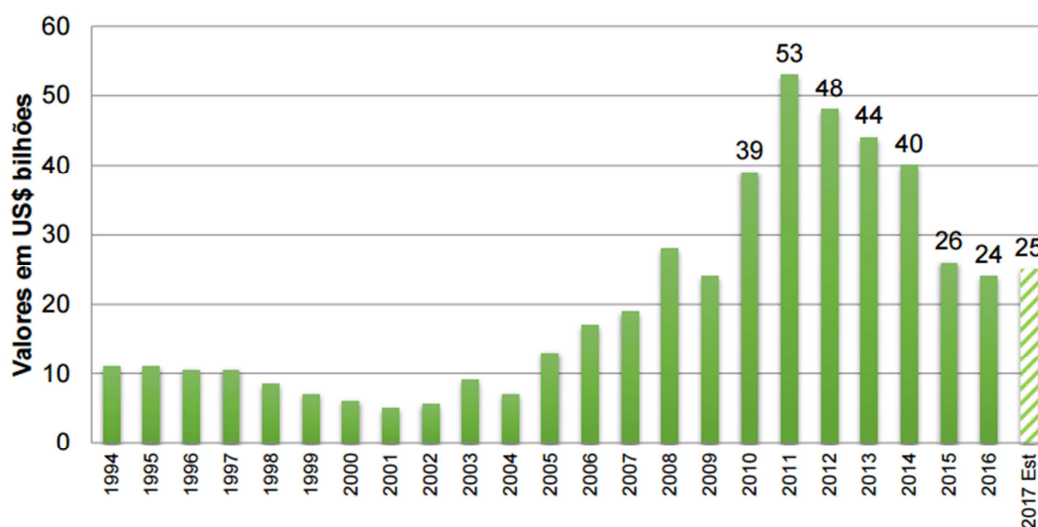


Figura 1 - Produção Mineral Brasileira  
Fonte: IBRAM (2017).

A partir disso, o presente trabalho trata do seguinte problema de pesquisa: “Como está a aplicação das técnicas da Pesquisa Operacional no setor de mineração?”. A justificativa para a pesquisa está relacionada à importância desse setor industrial na economia nacional e local, principalmente na região do Alto Paraopeba, em Minas Gerais. Entender como está o cenário da literatura sobre o assunto é um importante passo para analisar problemas reais das empresas locais.

A Engenharia de Produção participa do setor mineral na busca de otimização de quaisquer tipos de processos, desde as operações da empresa, até as pesquisas de oportunidades financeiras de análise de projetos para investimento. Assim, é formada a interdisciplinaridade entre essa área com a Engenharia Mineral, cuja função primordial é aproveitar os recursos minerais através da exploração de minas, atuando na extração, tratamento, refinamento e blendagem dos produtos.

Outra importância significativa da indústria mineral está relacionada à geração de empregos, principalmente na região Sudeste do país, que abriga 51,8% dos trabalhadores do setor de extração mineral, composto por 626.825 postos de trabalho espalhados pelo país (DNPM, 2016). Mais de 400 cidades mineiras contam com atividades de mineração, sendo as de maior representatividade de produção mineral: Nova Lima, Mariana, Itabira (maior do país) e Congonhas (DNPM, 2014; IBRAM, 2015). Minas Gerais ocupou a primeira posição no ranking de relatórios de pesquisa aprovados na indústria mineral, com 73 pesquisas apresentadas até o mês de março de 2017, representando 21,8% do total de pesquisas no ramo mineral do país (DNPM, 2017).

Segundo o IBRAM (2015), Minas Gerais é o estado com maior importância no setor mineral, com extração mensurada em 180 milhões de toneladas por ano de minério de ferro, representando 53% da produção brasileira de minerais metálicos e 29% de minerais gerais. Minas Gerais é o maior extrator de minério de ferro, ouro, zinco, fosfato e nióbio, a segunda maior na extração de bauxita e a terceira maior na produção de níquel. Além disso, o estado possui a maior reserva de manganês do país (IBRAM, 2015).

A partir desse contexto, o objetivo do presente artigo, então, é apresentar, por meio de um estudo bibliométrico, como está a aplicação das técnicas de Pesquisa Operacional no setor industrial de mineração. Para isso, será necessário encontrar trabalhos que tratem dos temas em concomitância, analisar qualitativa e quantitativamente os resultados e expor os principais achados com a pesquisa.

## **2 REFERENCIAL TEÓRICO**

Será feita uma breve revisão da literatura sobre os temas pertinentes a este trabalho, beneficiamento mineral e pesquisa operacional, ora de forma independente ou conjuntamente.

### **2.1 Beneficiamento mineral**

Minerais são sólidos naturais com arranjo atômico ordenado, composição química homogênea e definida, geralmente obtidos por processos inorgânicos (WILLS, 2011; KLEIN & DUTROW, 2012). Trata-se de minério toda rocha constituída de mineral e/ou agregado de minerais que podem ser aproveitados economicamente. Os conceitos de beneficiamento e tratamento de minerais são indistintos e estão relacionados às operações realizadas para modificar a granulometria e concentração dos materiais minerais sem alterar propriedades físicas e químicas, conceito esse contestado por alguns autores que consideram mudanças de ordem química na decomposição térmica e suas reações (CHAVES, 2006; LUZ; SAMPAIO; FRANÇA, 2010).

O objetivo da atividade de beneficiamento mineral, segundo Chaves (2006), é descobrir, lavar e concentrar minério. Ainda segundo o autor, as atividades do engenheiro tratamentista compreendem: reduzir o tamanho das partículas; separar as partículas em conjuntos específicos de tamanhos; concentrar teores de elementos demandados; eliminar

*ganga* (minerais não aproveitados); eliminar propriedades indesejadas; manusear o minério entre as atividades sucessivas de beneficiamento; e separar sólidos de líquidos.

Hartman e Mutmanský (2002) determinam que o primeiro estágio a ser observado na exploração mineral é a busca pelo minério e outros minerais valiosos, uma vez que esses materiais podem estar localizados embaixo da terra, demandando técnicas diretas e indiretas de exploração. Quanto às operações fundamentais de processamento mineral, Wills (2011) destaca que a separação, onde se distingue os minerais valiosos da *ganga* (processo denominado *cominuição*) e a concentração, onde se adequa o minério à demanda do cliente. Chaves e Peres (2012) corroboram a ideia, afirmando serem essas operações necessárias por diversas razões, como auxílio no manuseio dos materiais, permissão de transporte contínuo, entre outras.

## **2.2 Pesquisa Operacional**

Com a evolução marcada pela Segunda Guerra Mundial, a Pesquisa Operacional (PO) surgiu com o objetivo de apoiar decisões logísticas, táticas e estratégicas no âmbito militar, para melhor administrar operações de comboio e antissubmarinos. A partir disso, a PO cresceu rapidamente, ganhando espaço em ambientes com vários cenários, facilitando a tomada de decisão e otimizando processos em diferentes áreas, como transportes, construção, telecomunicações, planejamento financeiro, entre outros (ARENALES et al., 2007; TAHA, 2008; BELFIORE & FÁVERO, 2013; HILLIER & LIEBERMAN, 2013).

Lachtermann (2009) explica a tomada de decisão como processo onde se identifica um problema, ocorrido quando o estado atual de algo é diferente do desejado, ou uma oportunidade, ocorrida quando há a chance de se ultrapassar ou alterar objetivos. Assim, seleciona-se uma linha de ação e resolve-se a situação. O processo decisório é tão importante que, desde muito tempo, várias ciências atuam no seu auxílio, como a psicologia, a ciência da computação, ciências administrativas, entre outras.

A PO destaca-se pelo grande número de técnicas para solução de problemas de tomada de decisão. Belfiore e Fávero (2013) agrupam essas técnicas em três grandes grupos: os modelos determinísticos, onde as variáveis envolvidas são constantes e conhecidas; os modelos estocásticos, onde variáveis aleatórias são características definidas por meio de funções de probabilidade; e outras técnicas advindas com o desenvolvimento computacional e aplicação de técnicas de outras ciências na Pesquisa Operacional.

Os modelos determinísticos são compostos por um conjunto de restrições do problema que devem ser atendidas em uma função objetivo, geralmente de maximização de lucros ou de minimização de custos. As soluções desse método são ditas matematicamente ótimas. Segundo Belfiore e Fávero (2013), esses são divididos em:

- Programação linear: onde a função objetivo e todas as restrições do modelo são formadas por funções lineares e as variáveis de decisão são contínuas;
- Programação não linear: análoga à linear, porém em seu conjunto de restrições pode haver uma equação não linear, ou seja, variáveis que não são de primeira ordem;
- Programação em redes: estruturadas por grafos ou redes que consistem em nós, os quais são conectados a um ou mais arcos;
- Programação binária e inteira: onde a binária é caracterizada por variáveis discretas e binárias, do tipo 0 ou 1; e a inteira é quando todas as variáveis do modelo são discretas. Se um problema tiver algumas dessas variáveis e outras contínuas, o modelo é denominado de programação inteira mista;
- Programação por metas (multiobjetivo): considerando problemas com mais de um objetivo;
- Programação dinâmica determinística: quando o problema inicial pode ser decomposto em subproblemas.

Quando uma das características operacionais é descrita por meio de funções de probabilidade, o modelo pode ser resolvido por técnicas estocásticas, analisando cenários possíveis, mas não garantindo a solução ótima. São geralmente resolvidos por meio de métodos numéricos. Belfiore e Fávero (2013) os dividem em:

- Teoria das filas: estuda comportamentos de sistemas nas formações de filas por meio de análises matemáticas;
- Modelos de simulação: técnica que estuda comportamento de sistemas reais através de modelos, que podem ser determinísticos ou estocásticos;
- Programação dinâmica estocástica: semelhante à determinística, porém é caracterizada por ter ao menos uma variável aleatória;
- Teoria dos jogos: técnica matemática que estuda a tomada de decisão entre dois ou mais indivíduos que interagem entre si.

As outras técnicas, também bastante difundidas no âmbito da PO, compreendem a metodologia multicritério de apoio à decisão, análise envoltória de dados, inteligência artificial, inteligência computacional, heurísticas e metaheurísticas. Uma heurística é definida

como um procedimento de busca guiada por intuição, regras e ideias, buscando uma boa solução, enquanto a metaheurística representa a combinação de procedimentos de buscas com estratégias de alto nível, a fim de se encontrar o ótimo global, descartando ótimos locais (BEFIORE & FÁVERO, 2013, HILLIER & LIEBERMAN, 2013).

As ferramentas de pesquisa operacional foram descritas resumidamente para melhor entender suas principais características, semelhanças e diferenças, lembrando que um problema pode ser resolvido por várias técnicas diferentes, inclusive podendo gerar resultados similares a ponto de não se poder afirmar qual seria a ferramenta mais viável para solução da questão estudada (RODRIGUES; PINTO, 2012).

### **2.3 Pesquisa operacional no setor de minério de ferro**

Os primeiros trabalhos que aplicam a Pesquisa Operacional no setor industrial da mineração datam de meados da década de 1960, conforme Hustrulid e Kuchta (1995 apud Amaral e Pinto, 2010). Os autores ainda afirmam que por mais que existam diversos modelos de PO para aplicação em problemas envolvendo o setor de minério de ferro, ainda há uma lacuna tanto teórica quanto prática nos horizontes de curto e longo prazo. Pantuza Jr., Souza e Cabral (2009) salientam a importância da substituição do método de tentativa e erro, utilizado por muitas empresas para o planejamento e controle da produção, para metodologias da Pesquisa Operacional, uma vez que possibilitam várias soluções viáveis com menor tempo, gerando oportunidades de tomada de decisão ao planejador.

As áreas mais comuns de utilização da PO na mineração são a blendagem de minérios, que determina a quantidade ótima da composição do produto mineral, e o planejamento operacional de lavra, que aloca os equipamentos de carga dentro da mineradora, considerando as frentes de retirada do ROM (Run-of-mine, ou minério lavrado diretamente da rocha), considerando os minerais valiosos e a ganga, direcionando para as usinas de beneficiamento, de modo a manter a qualidade do produto e diminuindo a quantidade de equipamentos necessários. Na obra de Rodrigues (2006) é destacada a importância da minimização de custos nesse processo de logística, uma vez que é um dos maiores participantes do custo total de produção.

Moraes (2005) aplica a pesquisa operacional na blendagem de minério, onde conseguiu uma composição ótima de lotes do material, atendendo os requisitos necessários de produção e qualidade. As aplicações de PO na indústria mineral, em sua grande maioria, é



advinda de aprimoração de modelos anteriores. Este modelo usado na blendagem foi uma adaptação, segundo a autora, do modelo de Merschmann (2002), o qual apresenta a Pesquisa Operacional em duas ferramentas, estocástica e determinística, para alocar equipamentos nas frentes de lavra, com alocação dinâmica e estática de caminhões.

### 3 METODOLOGIA

O presente artigo trata-se de uma revisão bibliométrica, método quantitativo e estatístico que mede índices de propagação do conhecimento científico, analisando a essa propagação e tornando-se importante ferramenta analítica para analisar o estado da arte sobre determinado tema (SAES, 2000; VANTI, 2002). A análise abrangeu obras publicadas sobre a aplicação de ferramentas da Pesquisa Operacional na indústria de minério de ferro.

Para esse estudo foram analisados artigos sobre o tema, publicados entre os anos de 2006 e 2016, em periódicos e congressos, nacionais e internacionais. Os artigos selecionados de revistas seguiram do conceito A1 ao conceito B4 determinado pela CAPES na área de Engenharias III, segundo a classificação de 2015, disponível na Plataforma Sucupira. Os congressos selecionados estão relacionados às áreas de Engenharia de Produção, Pesquisa Operacional e Modelagem Computacional. A busca foi feita seguindo duas palavras-chave essenciais: pesquisa operacional e mineração, resultado em noventa e três artigos. A partir disso, removeram-se as obras que não tratavam diretamente do assunto, a partir da leitura dos títulos e resumos, restando o quantitativo de vinte artigos no período indicado.

Os meios utilizados para a busca dos artigos foram: Google acadêmico, Portal de periódicos da CAPES, bases Scielo e Scopus. Foram buscados os periódicos na área de Pesquisa Operacional e Mineração, na plataforma Sucupira e, posteriormente, buscou-se diretamente no próprio *site* das revistas encontradas, trabalhos correlatados. Os currículos Lattes dos autores que apareceram em quantidades notáveis no decorrer da pesquisa foram consultados na busca de trabalhos publicados na temática estudada.

Posteriormente à coleta, os artigos passaram pelo processo de análise, onde foram feitos fichamentos individuais de cada um, destacando os itens mais relevantes para o presente estudo. Após esses fichamentos, os itens foram agrupados e analisados quantitativamente, conforme a seção 4 deste trabalho. Não foram analisadas teses e dissertações pelo fato de esses trabalhos resultarem em publicações de artigos científicos.



## 4 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

### 4.1 Trabalhos analisados

A Tabela 1 apresenta a relação dos vinte trabalhos analisados no presente estudo bibliométrico, seus respectivos autores, anos de publicação e veículos onde foram publicados.

TABELA 1 – Trabalhos analisados na revisão bibliométrica

Id	Autoria	Ano	Título	Publicação
1.	MORAES, E. F.; ALVES, J. M. C. B.; SOUZA, M. J. F.; CABRAL, I. E.; MARTINS, A. X.	2006	Um modelo de programação matemática para otimizar a composição de lotes de minério de ferro da mina Cauê da CVRD.	Revista Escola de Minas
2.	GUIMARÃES, I. F.; SOUZA, M. J. F. ; PANTUZA JÚNIOR, G. .	2007	Modelo de simulação computacional para validação dos resultados de alocação dinâmica de caminhões com atendimento de metas de qualidade e de produção em minas a céu aberto.	Simpósio de Engenharia de Produção
3.	FIORONI, M. M.; FRANZESE, L. A. G.; BIANCHI, T. J.; EZAWA, L. ; PINTO, L. R. ; MIRANDA JR., G. .	2008	Concurrent simulation and optimization models for mining planning.	Proceedings of the 40th Conference on Winter Simulation
4.	COELHO, I. M. ; RIBAS, S. ; SOUZA, M. J. F. .	2008	Um Algoritmo baseado em GRASP, VND e Iterated Local Search para a Otimização do Planejamento Operacional de Lavra.	Encontro de Modelagem Computacional
5.	PANTUZA JR, G.; SOUZA, M. J. F. ; CABRAL, I. E. .	2009	Uma nova formulação de programação matemática para o problema de planejamento de lavra.	Revista Gestão da Produção, Operações e Sistemas
6.	RIBAS, S. ; COELHO, I. M. ; SOUZA, M. J. F. ; MENOTTI, D. .	2009	ParallelIterated Local Search aplicado ao planejamento operacional de lavra.	Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional
7.	COELHO, I. M. ; RIBAS, S. ; SOUZA, M.J.F. ; COELHO, V. N. ; OCHI, L. S.	2009	A hybrid heuristic algorithm based on GRASP, VND and Path Relinking for the open-pit-mining problem.	Iberian Latin America Congress on Computational Methods in Engineering
8.	AMARAL, M. d; PINTO, L. R.	2010	Planejamento de operações de lavra em minas a céu aberto com alocação de equipamentos de carga e de transporte.	Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional
9.	PANTUZA JR, G.; SOUZA, M. J. F. .	2010	O algoritmo NSGA II aplicado ao planejamento de lavra de minas a céu aberto.	Simpósio de Pesquisa Operacional da Marinha
10.	He, M., Wei, J., Lu, X. and Huang, B.	2010	The Genetic Algorithm for Truck Dispatching Problems in Surface Mine.	Information Technology Journal
11.	Souza, M.J.F.; COELHO, I. M. ; RIBAS, S. ; SANTOS, H. G. ; MERSCHMANN, L. H. C. .	2010	A hybrid heuristic algorithm for the open-pit-mining operational planning problem.	European Journal of Operational Research
12.	PANTUZA JÚNIOR, G. ; Souza, M.J.F. .	2010	Um modelo de programação matemática para o problema de planejamento de lavra considerando o método de lavra seletiva.	Simpósio de Engenharia de Produção
13.	COELHO, V. N. ; Souza, M.J.F. ; COELHO, I. M. ; RIBAS, S. .	2010	Busca Geral em Vizinhaça Variável com Reconexão por Caminhos para o Planejamento Operacional de Lavra.	Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional
14.	ARAÚJO, F. C. R. de; SOUZA, M. J. F.	2011	Uma heurística para o planejamento operacional de lavra com alocação dinâmica de caminhões.	Revista Escola de Minas
15.	ANDRANDE, R. Q; GLOBOVALENTE, A. F. M., PRAZERES, I. P., OLIVEIRA, L. M., MARTINS, L. L.	2011	Aplicação de simulação de processos em um sistema de carregamento e pesagem de caminhões em uma mina.	Encontro Nacional de Engenharia de Produção
16.	RODRIGUES, L. F.; PINTO, L. R.	2012	Análise comparativa de metodologias utilizadas no despacho de	Revista Escola de Minas

			caminhões em minas a céu aberto.	
17.	COELHO, V. N. ; Souza, M.J.F. ; COELHO, I. M. ; GUIMARAES, F.G. ; LUST, T. ; CRUZ, R.C. .	2012	Multi-objective approaches for the open-pit mining operational planning problem.	Electronic Notes in Discrete Mathematics
18.	SANTOS, A. T. ; MARUJO, L.G.	2013	O problema de fluxo multiproduto para alocação de frota heterogênea em ferrovias.	Simpósio de Pesquisa Operacional da Marinha
19.	SILVA, A. A. ; SOUZA, M. J. F. ; GUIMARÃES, V. L. ; MARTINS, A. G. .	2014	Planejamento Operacional de Lavra: Um Estudo de Caso.	Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional
20.	LEMKE, N.; LIMA, M. L. P.	2015	Análise das condições operacionais do porto do Rio Grande utilizando a técnica de simulação.	Seminário e Workshop em Engenharia Oceânica

Fonte: Elaborado pelo autor (2017).

## 4.2 Análise dos anos das publicações

O estudo bibliométrico compreendeu publicações no período de 2006 a 2016. Dentre os trabalhos analisados, observa-se na Figura 2 a predominância de publicações no biênio 2010-2011, com um total de 8 trabalhos, seguida dos anos anteriores, 2008-2009, com 5 artigos publicados na área. A partir dessa análise, infere-se que a aplicação de ferramentas da Pesquisa Operacional apresentada em trabalhos acadêmicos teve um crescimento entre 2008 e 2011, tendo após essa data um decréscimo. Em 2016 não foram localizados trabalhos publicados com essa temática, dentro da metodologia proposta, fato de o ano não estar plotado no gráfico.

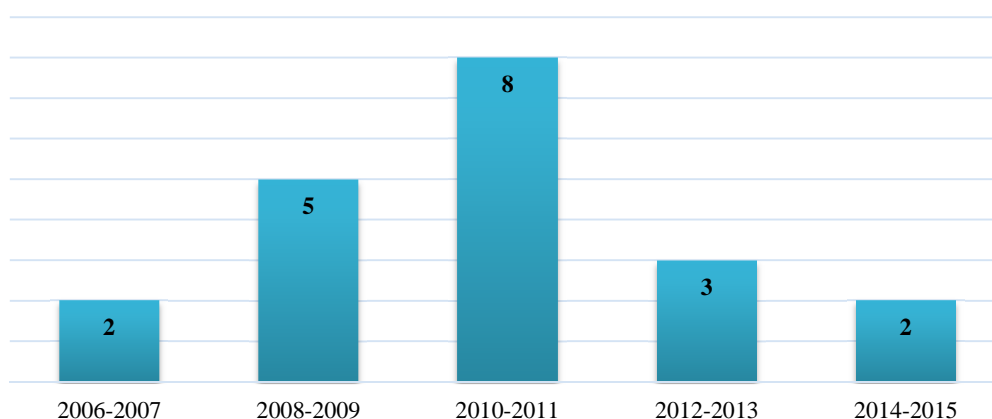


Figura 2 – Extração de publicações por ano  
Fonte: Elaborado pelo autor (2017).

### 4.3 Tipos de ferramentas da Pesquisa Operacional utilizadas

Conforme visto, há diferentes tipos de ferramentas da PO aplicáveis no âmbito da tomada de decisão, mas não se pode afirmar a superioridade de eficiência de cada uma, senão pela análise de caso a caso, considerando-se a solução alcançada e o tempo incorrido. Intuitivamente, só pode-se dizer que os modelos determinísticos levam à solução ótima, enquanto os demais não garantem esse cenário. Assim, na Tabela 2 são apresentadas as ferramentas utilizadas nas obras relatadas e na Tabela 3 o quantitativo de uso de cada uma. É importante ressaltar que alguns trabalhos utilizaram mais de uma técnica como metodologia, até mesmo para o propósito de comparação da eficiência, motivo pelo qual o somatório das ferramentas é superior ao total de obras analisadas.

Tabela 2 – Ferramentas da PO utilizadas nos artigos

Artigo	Tipo de Programação
01	Programação por Metas
02	Programação por Metas + Simulação
03	Simulação
04	Heurística + Programação por Metas
05	Programação por Metas
06	Heurística e Metaheurística
07	Heurística e Metaheurística
08	Heurística
09	Programação por Metas
10	Algoritmo Genético
11	Heurística
12	Programação por Metas
13	Heurística
14	Metaheurística
15	Simulação
16	Programação Linear, Dinâmica e Heurística
17	Heurística
18	Programação Inteira
19	Metaheurística
20	Simulação

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 3 – Quantitativo da utilização das ferramentas

<b>Ferramenta</b>	<b>Qtde.</b>
Algoritmo Genético	1
Programação Linear	1
Programação Dinâmica	1
Programação Inteira	1
Metaheurística	4
Simulação	4
Heurística	8
Programação por metas	8

Fonte: Elaborado pelo autor

Analisando a Tabela 3, percebe-se a predominância da programação por metas, ou multiobjetivo, juntamente com as técnicas heurísticas. Como os problemas de mineração que envolvem Pesquisa Operacional geralmente estão ligados à blendagem (mistura e composição do minério), a programação por metas faz com que várias condições essenciais, como qualidade e produção, sejam atendidas numa mesma formulação matemática, motivo pelo qual há a predominância desse método nos trabalhos analisados. Já as heurísticas são escolhidas pelo fato de possibilidade da busca por cenários ideais, chegando algumas vezes ao cenário ótimo, guiada por intuição, regras e ideias dos modeladores do cenário.

As metaheurísticas, definidas como estratégias de buscas de nível mais avançado que descartam ótimos locais, ficaram empatadas com os modelos de simulação, os quais apresentam soluções probabilísticas através de análise de dados históricos do sistema. Nos trabalhos, as metaheurísticas foram embasadas por algoritmos já existentes que foram adaptados ao problema em estudo. Já a simulação também foi usada para validar resultados de outras ferramentas, como a programação por metas, onde Guimarães, Souza e Pantuza Jr. (2007) afirmam ser ambos os métodos poderosos no auxílio à tomada de decisão.

#### **4.4 Artigos em revistas e congressos**

Como o estudo baseou-se apenas em artigos publicados em anais de congressos e periódicos, tanto nacionais quanto internacionais, é relevante destacar o quantitativo de trabalhos analisados em cada um dos meios de publicação. A Figura 3 apresenta essa

diferença, enquanto a Tabela 4 mostra o *Qualis* das revistas de onde os artigos foram extraídos.

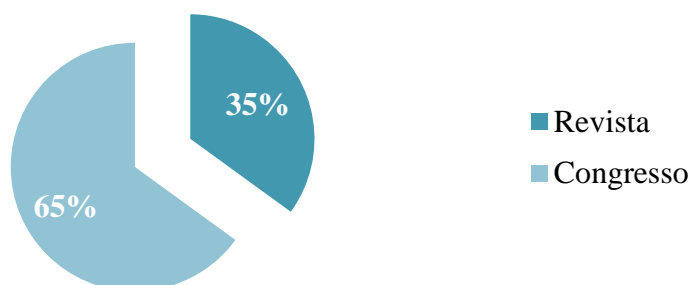


Figura 3 – Extração de artigos por meio de publicação.

Fonte: Dados da pesquisa (2017).

Tabela 4 – *Qualis* das revistas

<b>Qualis</b>	<b>Qtde.</b>
A1	1
A2	0
B1	0
B2	0
B3	3
B4	1
B5	0
C	0
Sem <i>Qualis</i>	1

Fonte: Elaborado pelo autor (2017).

Quanto ao *Qualis* dos periódicos, nota-se que grande parte dos trabalhos vem da classificação B3, com um total de quatro trabalhos, enquanto nos estratos *Qualis* A1 e B4 há um trabalho em cada periódico indexado, assim como há um trabalho em periódico não qualificado pela CAPES. Todas as análises foram feitas de acordo com a última classificação disponível, a de 2015, e foi considerada a área de Engenharias III, onde está agrupada a Engenharia de Produção.

Conforme visto, grande parte dos trabalhos analisados é advinda de congressos, os quais estão relacionados às áreas de Engenharia de Produção, como o Encontro Nacional de

Engenharia de Produção (ENEGEP) e o Simpósio de Engenharia de Produção (SIMPEP). Na área de Pesquisa Operacional, há trabalhos do Simpósio de Pesquisa Operacional da Marinha (SPOLM) e do Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional (SBPO). Por fim, há trabalhos na área de Modelagem Computacional dos congressos *Iberian Latin America Congress on Computational Methods in Engineering (CILAMCE)*, *Proceedings of the 40th Conference on Winter Simulation (WSC)* e Encontro de Modelagem Computacional (EMC), além de um artigo que trata da logística da mineração em portos, na área de Engenharia Oceânica.

A Tabela 5 apresenta a relação das quantidades de trabalhos publicadas em cada um dos congressos citados. Vale ressaltar que a Pesquisa Operacional e a Modelagem são áreas que podem ser encontradas dentro da Engenharia de Produção, porém, a tabela divide essas três áreas pelo foco principal do congresso, uma vez que nem todos os trabalhos da PO são unicamente da Engenharia, por exemplo.

Tabela 5: Publicações por congressos

Área	Congresso	Qtde.	Frequência
<b>Pesquisa Operacional</b>	SBPO	4	30,8%
	SPOLM	2	15,4%
<b>Engenharia de Produção</b>	ENEGEP	1	7,7%
	SIMPEP	2	15,4%
<b>Modelagem Computacional</b>	EMC	1	7,7%
	CILAMCE	1	7,7%
	WSC	1	7,7%
<b>Outros</b>	SEMENGO	1	7,7%

Fonte: Elaborado pelo autor (2017).

#### 4.5 Principais objetivos dos problemas analisados

Os principais problemas da área de mineração que são resolvidos através de ferramentas de Pesquisa Operacional estão ligados na determinação dos ritmos de lavra nas frentes de minério, na tentativa de redução da utilização de carregadeiras e caminhões, buscando manter altos índices de produção sem alterar a qualidade do produto. Alguns autores denominam essa programação como POLAD – Planejamento Operacional de Lavra com Alocação Dinâmica, esta última referente à alocação dos caminhões (PANTUZA JR.; SOUZA; CABRAL, 2009; SILVA et al., 2014).

Outros objetivos também destacados nas obras estão ligados à redução de custos de logística interna, blendagem de minérios e a própria comparação de métodos, geralmente envolvendo os modelos simuladores para validarem as programações matemáticas. Também foi observado em um trabalho o propósito de alocar a quantidade máxima de minério nos vagões compatíveis, com intuito de redução de custos logísticos.

#### 4.6 Softwares utilizados nos trabalhos

Conforme a Tabela 3, a maior parte dos trabalhos utilizam-se de ferramentas determinísticas da PO, e os *softwares* que são utilizados para problemas desse tipo de programação foram, consequentemente, os mais utilizados. Esses *softwares* utilizados em cada um dos artigos estão descritos na Tabela 6 e o quantitativo destes está apresentado na Figura 4, onde se observa que o Lingo e o CPLEX foram os mais utilizados, seguidos do Arena, referência na área de simulação operacional. Os demais *softwares* tiveram uma menor taxa de utilização, explicada pelas metodologias distintas selecionadas pelos autores para resolução dos problemas. Assim como a parte de métodos aplicados, os *softwares* utilizados terão quantitativo total maior que o número total de trabalhos analisados, uma vez que alguns desses trabalhos utilizaram-se de mais de um *software* para atenderem seus objetivos, como apresenta a Tabela 6.



Tabela 6 – Extração de *softwares* utilizados nos trabalhos.

<b>Artigo</b>	<b>Tipo de Programação</b>
01	Lingo + Excel
02	Lingo e Arena
03	Arena
04	CPLEX
05	Lingo + Excel
06	CPLEX
07	CPLEX
08	AMPL/CPLEX
09	Builder
10	Matlab
11	CPLEX
12	Lingo
13	OptFrame e CPLEX
14	Delphi e Lingo
15	Arena
16	Delphi e Lingo
17	OptFrame
18	XPRESS-MP
19	Lingo + Eclipse
20	Arena

Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

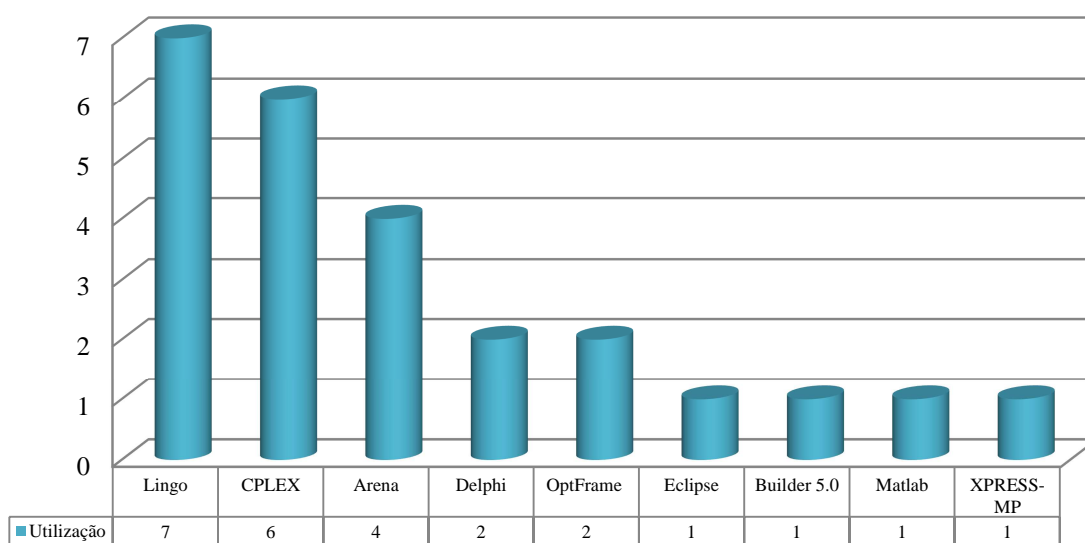


Figura 4 – Extração de *softwares* utilizados nos trabalhos  
Fonte: Elaborado pelo autor (2017).

#### 4.7 Associação institucional dos autores

A fim de melhor visualizar as instituições de onde proveem maior parte dos trabalhos realizados no âmbito da Pesquisa Operacional na área de mineração, foram extraídas as afiliações dos autores, mostradas na Tabela 7. A quantidade de publicações é maior que o total analisado de trabalhos pelo fato de haver artigos cooperados entre instituições distintas.

Tabela 7 – Instituições de afiliação dos autores

Instituição	Publicações
Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP	15
Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG	4
Universidade Federal Fluminense – UFF	3
Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ	1
Instituto Federal de Minas Gerais – IFMG	1
Universidade Federal de São Carlos – UFSCar	1
Centro Federal de Educação e Tecnologia – CEFET RJ	1
Universidade Federal do Rio Grande – FURG RS	1

Fonte: Elaborado pelo autor (2017).

Conforme observado, a UFOP lidera as pesquisas no setor de mineração envolvendo Pesquisa Operacional, tendo sido citada em 15 dos 20 artigos analisados. A maior parte desses artigos é proveniente do DECOM – Departamento de Computação, mas também há trabalhos advindos do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral. A UFMG, segunda colocada, teve apenas um artigo com todos os autores associados a ela, sendo os demais publicados em cooperações interinstitucionais, assim como a UFF. As demais faculdades tiveram apenas uma publicação cada.

#### **4.8 Principais resultados**

Comparando os resultados dos trabalhos, podem-se destacar as seguintes proposições:

- Algoritmos gerados por meio de heurísticas e metaheurísticas apresentaram alta competitividade quando comparados com algoritmos já existentes em técnicas determinísticas. Algumas vezes, estes foram ainda mais eficientes que os propostos pela literatura, principalmente no quesito de tempo de geração da solução;
- Operações onde não se enxergam muitas soluções de otimização, como carregamento de minério, podem ser otimizadas através de técnicas de Pesquisa Operacional;
- Metodologias diferentes trazem resultados muito parecidos, concluindo-se a eficiência das ferramentas comparadas;
- É possível minimizar custos e encontrar melhores cenários mineradores lançando mão de ferramentas da PO;
- As técnicas de Pesquisa Operacional sobressaem-se quando comparadas aos métodos tradicionais utilizados pelas mineradoras, geralmente a experiência dos funcionários do setor, que trabalham com planilhas de dados.

### **5 CONCLUSÕES**

Ao fim da exposição das análises propostas nesta revisão bibliométrica, conclui-se que a Pesquisa Operacional é uma aliada na indústria de minério de ferro, principalmente nos processos de planejamento de lavra com alocação de caminhões, isto porque permitem redução do uso de maquinário para conseguirem índices ainda mais altos de produção, sem perder a qualidade requerida do material. Viu-se que a UFOP é a universidade com maior número de recentes publicações, fator esse explicado pelo fato de a cidade de Ouro Preto ser

rodeada pelas maiores mineradoras do país, como a Vale, Samarco e a CSN, dentre outras de menor porte.

Conclui-se também que as ferramentas determinísticas são as mais utilizadas, elucidando o fato de que a oportunidade de geração da solução ótima é ainda a técnica mais atraente da PO. Porém, é importante ressaltar que não se pode afirmar que estas são as melhores técnicas, uma vez que a literatura cita situações em que metodologias diferentes de PO chegam a resultados eficientes.

Por fim, como foi visto que o número de trabalhos nessa área tem tido um pequeno decréscimo, salienta-se a importância de manter os estudos envolvendo a relação das técnicas na indústria mineral, uma vez que esta tem um grande potencial de melhorias operacionais e de redução de custos, possibilitando uma melhora na economia brasileira que, como visto, tem uma parcela significativa dependente desse setor.

## 6 REFERÊNCIAS

AMARAL, M.; PINTO, L. R. Planejamento de operações de lavra em minas a céu aberto com alocação de equipamentos de carga e de transporte. In: Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, Bento Gonçalves, RS. **Anais do XLII SBPO**, 2010.

ARENALES, M. N.; ARMENTANO, V.; MORABITO, R.; YANESSE, H. **Pesquisa operacional**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2007.

CHAVES, A. P. **Teoria e prática do tratamento de minérios**: volume 1. 3. ed. rev. e amp. São Paulo: Signus, 2006.

CHAVES, A. P.; PERES, A. E. C. **Teoria e prática do tratamento de minérios**: britagem, peneiramento e moagem. 5. ed. São Paulo: Signus, 2012.

DNPM – Departamento Nacional de Produção Mineral. **Anuário Mineral Estadual**. Disponível em: <[http://www.dnpm.gov.br/dnpm/paginas/anuario-mineral-estadual/mg20102014/@@download/file/AMEst%202010%20a%202014\\_MG\\_v2.pdf](http://www.dnpm.gov.br/dnpm/paginas/anuario-mineral-estadual/mg20102014/@@download/file/AMEst%202010%20a%202014_MG_v2.pdf)>. Acesso em: 25 abr. 2017.

\_\_\_\_\_. **Sumário Mineral 2016 (1º semestre)**. Disponível em: <[http://www.dnpm.gov.br/dnpm/informes/informe\\_mineral\\_2\\_2016](http://www.dnpm.gov.br/dnpm/informes/informe_mineral_2_2016)>. Acesso em: 23 maio 2017.

\_\_\_\_\_. **Relatórios de pesquisa aprovados publicados mês a mês por superintendência - 2017**. Disponível em: <<http://www.dnpm.gov.br/dnpm/planilhas/estatisticas/relatorios-de-pesquisa/relatorios-pesquisa-aprovados-pub-2017-mes-a-mes-superindendencias>>. Acesso em: 23 maio 2017.

GUIMARÃES, I. F. ; SOUZA, M. J. F. ; PANTUZA JÚNIOR, G. Modelo de simulação computacional para validação dos resultados de alocação dinâmica de caminhões com atendimento de metas de qualidade e de produção em minas a céu aberto. In: Simpósio de Engenharia de Produção, 2007, Bauru, SP. **Anais do XIV SIMPEP**, 2007.

HARTMAN, H. L.; MUTMANSKY, J. M. **Introductory mining engineering**. 2. ed. New Jersey: J. Wiley & Sons, Inc., 2002.

HILLIER, F. S.; LIEBERMAN, G. J. **Introdução à pesquisa operacional**. 9. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 2013.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Pesquisa Industrial Mensal: Produção Física**. Disponível em: <[http://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/periodicos/228/pim\\_pfbr\\_2017\\_mar.pdf](http://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/periodicos/228/pim_pfbr_2017_mar.pdf)>. Acesso em: 23 maio 2017.

IBRAM - Instituto Brasileiro de Mineração. **Informações sobre a economia mineral brasileira**. Disponível em: <<http://www.ibram.org.br/sites/1300/1382/00005957.pdf>>. Acesso em 10 jan 17.

\_\_\_\_\_. **Produção Mineral Brasileira (PMB)**. Disponível em: <<http://www.ibram.org.br/sites/1300/1382/00006386.pdf>>. Acesso em: 23 maio 2017.

KLEIN, C.; DUTROW, B. **Manual de ciência dos minerais**. 23. ed. -. Porto Alegre: Bookman, 2012.

LACHTERMACHER, G. **Pesquisa operacional na tomada de decisões**. 4. ed. São Paulo: Pearson, 2009.

LUZ, A. B.; SAMPAIO, João Alves; FRANÇA, Silvia Cristina Alves. **Tratamento de Minérios**. 5. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010.

MERSCHMANN, L. H. C. **Desenvolvimento de um sistema de otimização e simulação para cenários de produção em minas a céu aberto**. Dissertação de mestrado, Programa de Pós Graduação em Engenharia de Sistemas e Computação, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2002.

MORAES, E. F. **Um modelo de programação matemática para otimizar a composição de lotes de minério de ferro da mina caué da CVRD**. Dissertação de mestrado, Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2005.

PANTUZA JR, G.; SOUZA, M. J. F. ; CABRAL, I. E. . Uma nova formulação de programação matemática para o problema de planejamento de lavra. **Revista Gestão da Produção, Operações e Sistemas (Online)**, v. 4, p. 125-137, 2009.

RODRIGUES, L. F.; PINTO, L. R. Análise comparativa de metodologias utilizadas no despacho de caminhões em minas a céu aberto. **Rem: Revista Escola de Minas**, v. 65, n. 3, 2012.

RODRIGUES, L. F. **Análise comparativa de metodologias utilizadas no despacho de caminhões em minas a céu aberto**. Dissertação (Mestrado) –Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.

SAES, S.G. **Estudo bibliométrico das publicações em economia da saúde no Brasil: 1989-1998**. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós Graduação em Administração, Serviços de Saúde, Faculdade de Saúde Pública Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

SILVA, A. A. ; SOUZA, M. J. F. ; GUIMARÃES, V. L. ; MARTINS, A. G. . Planejamento Operacional de Lavra: Um Estudo de Caso. In: Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, 2014, Salvador, BA. **Anais do XLVI SBPO**, 2014.

TAHA, H. A. **Pesquisa operacional**. 8. ed. São Paulo: Pearson, 2008.

VANTI, N. A. P. Da bibliometria à webometria: uma exploração conceitual dos mecanismos utilizados para medir o registro da informação e a difusão do conhecimento. **Ci. Inf.**, Brasília, v. 31, n. 2, p. 152-162, maio/ago, 2002.

WILLS, B. A. **Mineral processing technology**: an introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral recovery. 7 ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2011.